



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

LES PLASTIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT

Rapport de l'Académie des sciences – 16 mars 2021



Sommaire

Résumé exécutif	p. 3
Les plastiques dans l'environnement	p. 4
Introduction.....	p. 4
Les plastiques conquièrent le monde.....	p. 4
Les plastiques face au défi d'une économie circulaire.....	p. 6
Le devenir des plastiques dans l'environnement.....	p. 8
Recommandations.....	p. 14
Références bibliographiques.....	p. 18
Annexe : Les plastiques dans le monde.....	p. 23
Personnalités auditionnées.....	p. 24
Composition du comité des Sciences de l'environnement de l'Académie des sciences..	p. 26

Les plastiques, polymères de composition très variable, sont devenus des objets d'usage courant. La diversité de leur composition chimique leur confère des propriétés uniques dans le monde des matériaux : rigidité, souplesse ou élasticité, résistance mécanique et chimique. Leurs domaines d'application sont multiples : avions, automobiles, bâtiments, prothèses médicales, ordinateurs... Ils permettent aussi la conservation et le transport des produits industriels, alimentaires, médicaux et pharmaceutiques dans des conditions d'hygiène inégalées. Les plastiques sont devenus indispensables et leur production annuelle mondiale, passée de 1,5 million de tonnes en 1950 à plus de 350 millions de tonnes aujourd'hui, est toujours en croissance continue.

Difficiles à recycler et difficilement digérables par les micro-organismes, ils sont une source de pollution pour l'environnement dès lors qu'ils sont produits massivement pour des utilisations à durée brève, souvent inférieure à l'année, ou à usage unique. Considérés alors comme déchets, ils sont jetés dans des décharges, souvent mal contrôlées, ou transportés dans des centres de tri où seule une faible fraction sera effectivement recyclée. Une grande part des plastiques utilisés est rejetée dans l'environnement où ils se dégradent et polluent continents, eaux douces et océans.

L'Académie des sciences note que des efforts ont déjà été consentis pour réduire la pollution aquatique par les plastiques mais elle souligne qu'ils sont insuffisants pour empêcher une accumulation massive de ces déchets dans les écosystèmes continentaux et océaniques au cours des prochaines décennies. Pour mieux maîtriser l'économie des plastiques, elle recommande :

- de poursuivre les efforts individuels et collectifs pour réduire la pollution à la source en appelant à la sobriété de consommation, notamment en matière d'emballages, en améliorant le tri et en incitant les industriels à mettre en place des programmes de recherche et développement visant à remplacer les plastiques de commodité par des polymères plus facilement dépolymérisables ;
- de prévoir le recyclage des plastiques dès leur conception pour faciliter le passage à une économie circulaire ;
- de développer des polymères à faible impact environnemental, susceptibles de se biodégrader dans les milieux continentaux et marins sous l'action des micro-organismes ;
- de lancer un programme de recherche ambitieux, national et international dans le cadre de l'International Science Council (ISC), pour comprendre le cycle biogéochimique des déchets plastiques rejetés dans l'environnement, déterminer les flux et les tailles des particules transportées dans l'air, les eaux douces et les eaux marines et ainsi prévoir leur devenir ;
- de mieux évaluer l'impact des produits de dégradation des plastiques sur la faune et sur la santé des êtres humains en étudiant le comportement des micro- et nanoplastiques aux concentrations effectivement présentes dans les milieux naturels et en faisant appel à des recherches épidémiologiques ;
- d'étudier la possibilité de bloquer les déchets plastiques en les insérant dans des matériaux de longue durée de vie, comme ceux utilisés en fort tonnage pour la construction des bâtiments.

Les plastiques dans l'environnement

Introduction

Les plastiques, polymères de composition très variable, sont devenus des objets d'usage courant. Mais ils sont maintenant reconnus comme une source de pollution pour l'environnement. Ils affectent l'ensemble de la planète jusqu'aux régions les plus reculées, telles les calottes glaciaires des zones polaires ou les plus profondes fosses océaniques. Le Comité des sciences de l'environnement de l'Académie des sciences fait le point dans ce rapport sur le rôle des plastiques dans la vie courante et l'ampleur de la pollution dont ils sont responsables. Il présente des recommandations pour une utilisation raisonnée de ces polymères et pour un programme de recherche ambitieux destiné, d'une part à comprendre le devenir des déchets plastiques abandonnés dans le milieu naturel et évaluer leur impact sur les êtres vivants et, d'autre part, à élaborer des composés rendant les mêmes services à la société tout en étant recyclables ou aisément dégradables pour ne plus polluer le milieu naturel.

Les plastiques conquièrent le monde

Les plastiques sont nés il y a environ un siècle de la découverte des polymères synthétiques. Le polymère est une très grande molécule obtenue en liant entre elles des petites molécules identiques - unité de répétition ou monomères - par des liaisons chimiques fortes permettant de former une chaîne moléculaire. Si deux ou plusieurs monomères sont utilisés pour constituer la chaîne, on parle alors de copolymères. Typiquement les chaînes de polymères utilisées pour fabriquer les plastiques sont constituées de centaines, voire de milliers de monomères, synthétisés principalement à partir des hydrocarbures. Composés essentiellement de carbone, d'hydrogène ou éventuellement d'oxygène ou d'azote, les polymères offrent aux plastiques leur exceptionnelle légèreté, comparée au verre, aux métaux ou au béton. En outre, la longueur importante des chaînes de polymères confère aux plastiques des propriétés uniques dans le monde des matériaux : rigidité, souplesse ou élasticité suivant la composition de la chaîne, résistance mécanique, notamment aux chocs, et chimique en particulier à la corrosion. À tout cela s'ajoute une grande facilité et rapidité de mise en œuvre, très peu énergivore.

Dès l'origine, cette combinaison de propriétés des plastiques, tout à fait unique, a permis l'émergence d'industries nouvelles, telle l'industrie électrique, en substituant la Bakélite comme isolant au matériau naturel, mais rare, la laque. L'essor des plastiques a été spectaculaire par la diversité de ses applications, allant de la fabrication de pièces pour l'aéronautique, l'automobile et le bâtiment, de canalisations pour le transport de l'eau, du gaz et autres fluides, aux prothèses médicales, aux mousses d'isolation ou aux écrans d'ordinateurs. Les plastiques se sont également rapidement imposés comme matériaux de choix pour le conditionnement, se substituant au verre et au métal, en offrant des conditions d'hygiène, de conservation et de transport des produits industriels, alimentaires, médicaux et pharmaceutiques inégalées. Utilisés seuls ou en plusieurs fines couches, les plastiques constituent une barrière efficace contre les microbes, l'humidité ou l'oxydation : ils peuvent être imperméables à l'eau, aux huiles,

à l'alcool et aux autres solvants. Par un design adéquat, il est possible de moduler et contrôler ces effets barrières, par exemple dans le cas des films imper-respirants, imperméables à l'eau mais très perméables à la vapeur (Kim and Seo, 2018) ou encore dans le cas des emballages à l'atmosphère modifiée dans lesquels les films plastiques constituent une barrière sélective à l'oxygène, au gaz carbonique et à l'humidité, pour permettre de conserver plus longtemps des aliments frais (Belay *et al.*, 2016).

Aujourd'hui, plus de 5 300 formulations de polymères sont disponibles dans le commerce (<https://www.campusplastics.com/campus/list>) et plus de 4 000 produits chimiques connus sont associés aux seuls emballages en plastique (Groh *et al.*, 2019). Le marché mondial des plastiques concerne en volume environ pour 40% l'emballage, 20% le bâtiment, 10% l'automobile, 6% l'industrie électrique et électronique, 3% l'agriculture ; les 21% restant se répartissent en des applications diverses telles que les objets domestiques, l'ameublement, les sports et loisirs, la médecine, etc. (PlasticEurope, 2019). Au XX^e siècle, les chercheurs et industriels synthétisent un nombre impressionnant de divers polymères avec une panoplie et une combinaison de propriétés très riches. Cependant, pour des raisons surtout économiques, la production se concentre autour de quelques familles de plastiques dits « de commodité » : polyéthylène (PE 30%), polypropylène (PP 19%), polystyrène (PS 7%), polychlorure de vinyle (PVC 10%), polyuréthanes (PU 7%), polytéréphtalate d'éthylène (PET 7%) et polycarbonates (PC 1,5%). Les quelque 20% restants se partageant en divers polymères dits « de performance » ou « techniques », tels que les polyamides, polyacryliques et polymères fluorés. Le terme « plastique de commodité » ne doit pas tromper. Il s'agit en réalité de polymères très sophistiqués résultant d'années de recherche fondamentale et de développement. En jouant sur l'arrangement des monomères et les longueurs des chaînes, il est possible de modifier radicalement les propriétés du matériau pour obtenir par exemple un polyéthylène plus ou moins cristallin, flexible ou résistant à la chaleur. En utilisant des chaînes ultralongues mises en forme de façon astucieuse pour les désenchevêtrer, il est possible de fabriquer des fibres de PE présentant une résistance équivalente à celle de l'acier (Smith and Lemstra, 1980). De plus, en synthétisant directement des lots ou en préparant des mélanges de chaînes de longueurs très différentes, il est possible de produire des nuances faciles à mettre en œuvre, mais néanmoins très résistantes, en particulier pour les conduites de transport de l'eau chaude.

Par ailleurs, pour que cette gamme relativement limitée de polymères permette de répondre à des cahiers des charges de plus en plus exigeants de plastiques, des additifs sont ajoutés aux polymères. Par exemple, sont ajoutées des particules minérales (silicates ou carbonate de calcium) pour apporter de la rigidité, des plastifiants (adipates, phtalates, ...) pour au contraire assouplir le plastique, des antioxydants et des anti-UV pour empêcher la dégradation des propriétés au cours du temps, des additifs pour améliorer la résistance aux chocs, des retardateurs de flamme, des additifs pour améliorer la conduction électrique ou celle de la chaleur, ou pour apporter des propriétés antistatiques, etc. À cela s'ajoutent bien sûr les pigments et les colorants. La liste et les proportions exactes des molécules ainsi ajoutées sont souvent tenues secrètes car elle font partie du savoir-faire spécifique du producteur et transformateur, qui lui permet de se différencier de la concurrence.

Les plastiques sont devenus indispensables, comme en témoigne la croissance impressionnante en moins d'un siècle de la production annuelle mondiale, qui passe de 1 million de tonnes en 1950 à plus de 350 millions de tonnes aujourd'hui (cf. annexe p. 23). Cela représente une

quantité importante : si 40% de cette production annuelle consacrée à l'emballage était transformé en film alimentaire d'une épaisseur de 10 microns, ce film pourrait couvrir chaque année la surface entière de l'Europe. La demande de plastiques n'est pas uniforme. Ainsi, en 2015, elle était par habitant d'environ 100 kg/an en Corée, 80 kg/an aux États-Unis et de 60 kg/an en Europe, à comparer avec 40 kg/an en Chine, 10 kg/an en Inde et seulement 5 kg/an en Afrique (IEA, 2015). La production des plastiques double tous les douze ans environ, cette croissance rapide étant étroitement liée au développement économique (OPECST, 2020).

Les plastiques face au défi d'une économie circulaire

Cette croissance rapide de l'utilisation des plastiques interpelle néanmoins pour plusieurs raisons : une matière première non renouvelable (des hydrocarbures), un impact négatif sur l'environnement et une faible intégration dans une économie circulaire. À cet égard, la comparaison des courbes de la production mondiale des plastiques et de l'acier semble pleine d'enseignements. Si, de 1950 jusqu'aux années 1970, les deux courbes ont crû de façon parallèle, la production d'acier s'est stabilisée à partir de cette date alors que celle des plastiques a poursuivi sa croissance inexorable (committee.iso.org, 2016). Ainsi, en 1989, on a produit en volume (mais pas en poids) autant de plastiques que d'acier. Un des facteurs déterminants de cette stabilisation de la courbe de l'acier résulte des efforts qui ont été entrepris pour le recycler. Aux États-Unis, 72% de l'acier est produit à partir de la ferraille récupérée (BDSM, 2018), tandis que seulement 9 % des plastiques étaient recyclés en 2017 (EPA, 2019). Le fort taux de recyclage de l'acier a été rendu possible par une organisation du marché de la ferraille et par le développement des fours à arc électrique permettant de produire de l'acier, y compris de haute performance, en utilisant de la ferraille. A contrario, la forte production d'acier par la Chine, sans recours significatif à la ferraille récupérée, a provoqué à partir de 2000 la très vive reprise de la croissance de la production mondiale (BDSV, 2018). Il est donc essentiel d'examiner les voies qui pourraient conduire à une économie des plastiques plus maîtrisée, permettant d'accompagner les besoins des pays émergents dans le cadre de leur développement et de répondre aux besoins essentiels des pays industrialisés sans mettre en danger les écosystèmes et la santé des humains.

Recyclage mécanique

A priori, un plastique est recyclable à l'infini. Il peut être coupé en morceaux ou broyé, puis fondu et remis en production pour faire un nouvel objet. On parle alors de recyclage mécanique (Delma, 2020). En pratique, la situation est beaucoup plus complexe. Tout d'abord, ce processus, qui affecte la longueur des chaînes, dégrade les propriétés de la matière qui ne pourra dès lors plus être utilisée pour la même application. Ainsi, dans le cas emblématique des bouteilles transparentes en PET, le polymère recyclé est trop fluide pour être de nouveau mis en forme par des méthodes habituelles et perd également ses propriétés de résistance. Il ne peut donc être réutilisé qu'en faible proportion ajouté au PET, sauf à être modifié par post-polymérisation en état solide avant mise en forme (Delma, 2020). Si la réutilisation pour la même application est délicate (en Suisse, 100% des bouteilles en PET sont néanmoins recyclées), en revanche en accentuant le processus de coupure des chaînes, il est possible d'obtenir des grades très fluides utilisables pour d'autres applications, par exemple pour la fabrication de fibres textiles (« laine polaire »). Il n'en reste pas moins qu'à ce jour le taux de recyclage mécanique de la quantité de PET produite pour la fabrication des bouteilles transparentes reste faible. La présence d'additifs

dans les bouteilles plastiques colorées ou contenant du gaz carbonique sous pression accroît encore considérablement la complexité du recyclage mécanique.

Au faible résultat du processus de recyclage s'ajoute une phase préparatoire de collecte et de tri rendue très lourde par la faible capacité des longues molécules à se mélanger. Ainsi la contamination, même en très petite quantité, d'un polymère par un polymère de nature même très légèrement différente donne lieu, à l'issue du recyclage mécanique, à un matériau fragile difficilement utilisable. Pour contourner cet obstacle, il convient, préalablement au recyclage mécanique, d'organiser un tri très sélectif et rigoureux permettant de regrouper les déchets suivant leur nature chimique, voire suivant l'arrangement des monomères, comme c'est le cas pour le polyéthylène de haute et basse densité. La difficulté s'accroît encore davantage lorsque l'objet à recycler est lui-même composé de plusieurs couches ou d'un alliage de polymères. Décoller, éliminer la couche adhésive (qui est aussi un polymère) et séparer les différentes couches plastiques composant une grosse pièce d'automobile, par exemple, peut s'envisager. La même opération sur des objets moins volumineux tels des bouteilles de lait ou des films multicouches d'emballages alimentaires semble plus délicate.

Recyclage chimique

Le recyclage chimique qui transforme sélectivement les polymères en petites molécules constitue une méthode alternative de choix. Aujourd'hui, il se limite essentiellement à la pyrolyse ou thermolyse en présence de catalyseurs qui aident à transformer les polymères en gaz, en combustibles ou en cires (Panda, 2010). Cette méthode est peu utilisée car son coût énergétique est important et l'objectif de réutilisation en tant que plastique n'est pas atteint. Pour ce faire, il convient non pas juste de couper les polymères mais de les dépolymériser pour récupérer les monomères et les intégrer dans la fabrication d'un polymère vierge. Pour les polymères dont les monomères sont liés par des liaisons thermodynamiquement très stables, tels que le PE ou le PP, la dépolymérisation en monomères est un vrai défi. Pour les autres, en revanche, de vrais progrès ont été réalisés.

Ainsi pour le PET, deux méthodes, l'alcoolyse et l'hydrolyse, ont été mises au point par des entreprises comme par exemple Eastman, Ionica et Loop ; elles permettent de produire des monomères utilisables pour la fabrication du PET, même pour des applications exigeantes. Aujourd'hui, le coût du monomère recyclé (incluant collecte, lavage, tri et processus de dépolymérisation) est plus élevé que celui du monomère d'origine, et les capacités d'un atelier de dépolymérisation sont encore faibles (typiquement 20 kT/an) comparées à celles d'une usine de fabrication du PET produisant 350 kT/an. Il n'en reste pas moins que ces techniques font des progrès significatifs et sont encouragées par les clients.

Les biotechnologies sont apparues plus récemment comme une troisième approche de recyclage du PET et elles suscitent un vif intérêt. À l'origine, des chercheurs ont constaté que des bactéries telles que l'*Ideonella sakaiensis* 201-F6 sont capables de s'attaquer lentement au PET. Ils ont alors identifié des enzymes responsables de l'hydrolyse des chaînes du PET (Yoshida *et al.*, 2016). L'évolution dirigée de l'une de ces enzymes (une cutinase) a conduit à une amélioration spectaculaire de l'efficacité de l'hydrolyse et de la stabilité thermique de l'enzyme, au point qu'il est possible aujourd'hui d'envisager de construire un atelier pilote de dépolymérisation par catalyse enzymatique des déchets de PET (Tournier, 2020).

Le grand atout de ces trois méthodes de dépolymérisation du PET est leur sélectivité, ce qui

permet, même lorsque les déchets sont contaminés ou contiennent des additifs ou autres polymères, de dépolymériser uniquement le PET. L'opération de tri préalable devient alors moins stricte et le recyclage peut inclure des lots impropres au recyclage mécanique (par exemple les bouteilles colorées).

Incinération et compostage

Enfin, l'incinération propre des déchets plastiques, à défaut de pouvoir les intégrer dans un cycle économique fermé, permet d'éviter leur dissémination et de récupérer au moins une partie de l'énergie qui a été nécessaire à leur fabrication. Le but ultime est en tout état de cause d'éviter les plastiques dans les décharges, car l'écrasante majorité des polymères synthétiques n'est pas biodégradable. Les organismes (micro-organismes) vivants ne sont pas adaptés pour digérer et décomposer en gaz carbonique et eau ces matériaux synthétiques ayant à peine un siècle d'existence. La situation n'est pas sans précédent, il a fallu des millions d'années avant que n'apparaissent des organismes capables de biodégrader les polymères naturels telle la cellulose constituant l'essentiel des plantes (exemple les champignons sur les bois). Dans ce contexte, des efforts considérables sont déployés pour synthétiser des plastiques spécifiquement conçus dès l'origine pour être biodégradables. La difficulté majeure est de concilier cet objectif avec des cahiers des charges exigeants. Le succès de l'acide polylactique (PLA), polymère biodégradable en compostage industriel et de plus biosourcé, en tant que matériau de choix pour l'impression 3D et certains emballages, démontre qu'il est possible de trouver des substituts respectant l'environnement sans pour autant sacrifier les exigences techniques et économiques. Néanmoins le PLA est encore non recyclé.

Le devenir des plastiques dans l'environnement

Devenir des plastiques collectés

De nombreux progrès restent à faire pour réduire la pollution de l'environnement par les déchets des plastiques, même s'ils ont été collectés au maximum chez les utilisateurs. En 2016, l'Europe a produit environ 60 millions de tonnes de plastiques, dont 40% ont été utilisés comme emballages (*Revue de l'Institut Veolia*, 2019). Ceux-ci ne servent généralement qu'une fois et leur durée d'utilisation est brève, le plus souvent inférieure à l'année (*Geyer et al.*, 2017). Ils sont ensuite considérés comme des déchets, qui sont collectés et transportés dans des centres de tri. Cette même année, 27 millions de tonnes de déchets plastiques ont été collectés, dont environ 60% provenaient des emballages.

En sortie des centres de tri, seulement 30% des plastiques collectés sont destinés à un recyclage. Celui-ci est complexe car un tri très sélectif est indispensable et ce n'est qu'une très faible fraction d'entre eux (moins de 10% environ) qui sera effectivement recyclée en boucle fermée. Un peu plus de la moitié sera réutilisée après recyclage mécanique ou chimique dans des produits à bas coûts. Le reste sera perdu, soit incinéré soit rejeté dans l'environnement.

Comme l'Europe a une capacité de recyclage limitée, une partie des déchets était exportée vers des pays pouvant théoriquement les recycler, mais où les contraintes environnementales étaient faibles. C'est ainsi que, de 2008 à 2016, 31 millions de tonnes de déchets plastiques ont été exportés vers la Chine et des pays du Sud-Est asiatique (*Brooks et al.*, 2018). Depuis 2018, la Chine a interdit de telles importations, l'Inde a fait de même en 2019 et ces interdictions se

généralisent. Compte tenu de la qualité médiocre des conditions de prise en charge des déchets dans les pays en voie de développement, tout transfert de déchets des pays industrialisés vers les pays moins avancés est incompatible avec un objectif de développement durable pour les sociétés humaines. En bilan net pour l'Europe, l'essentiel des déchets plastiques est soit incinéré (environ 40%), soit stocké dans des décharges contrôlées (environ 30%).

Au plan mondial, la situation est pire. Sur les 8,3 milliards de tonnes de plastiques produites jusqu'en 2016, seulement 28% ont fait l'objet d'une utilisation durable. Seulement 7% ont été recyclés, 9% ont été incinérés et la majorité (55%) a été jetée dans des décharges souvent mal contrôlées, voire abandonnée dans des décharges sauvages (Geyer *et al.*, 2017).

Dégradation des plastiques dans l'environnement

Tous les plastiques se dégradent dès leur fabrication. Leur composition chimique est donc théoriquement choisie pour que la dégradation ne se produise qu'après leur durée d'usage prévue. Celle-ci est cependant souvent très inférieure à la durée de vie des déchets rejetés dans l'environnement. Là, ils continuent par conséquent à se détériorer sous l'influence du rayonnement solaire, mais aussi des micro-organismes. C'est par exemple le cas des masques chirurgicaux ou de protection respiratoire qui sont réalisés à partir de polypropylène et qui résistent à la dégradation pendant plusieurs dizaines d'années. Les bouteilles en plastique, pour leur part, mettent un à dix siècles pour se dégrader, les sacs quelque 400 ans et le polystyrène un millénaire. De nombreux ingrédients sont ajoutés aux polymères pour améliorer leurs propriétés : additifs pour améliorer la résistance aux chocs, aux UV ou au feu, antioxydants, plastifiants pour rendre les matières plastiques plus souples et plus flexibles, etc. Les produits de dégradation des plastiques et de leurs ingrédients passent dans l'environnement et ils sont loin d'être tous biodégradables (SAPEA, 2020).

En milieu continental, les déchets plastiques mal contrôlés sont transportés par les vents et les eaux douces, où ils subissent une première étape de fragmentation mécanique. Dans les sols, leur altération par des processus physiques, chimiques et biologiques provoque le relargage de divers composés chimiques comme les matériaux de charge, les additifs et leurs produits de dégradation ainsi que les produits qu'ils ont adsorbés, notamment des métaux ou des polluants organiques (Pathan *et al.*, 2020). Cette altération s'accompagne de la production de fragments qui ne se minéraliseront que lentement et partiellement (Lambert & Wagner, 2016). Les plus petits (taille <1mm) peuvent être repris par les vents et se déposer loin de leur site de production ou d'utilisation. Dans les centres urbains, ce sont les eaux usées qui sont le plus chargées en débris plastiques (Dris *et al.*, 2017). Au cours du traitement dans les centres d'épuration des eaux usées, les particules les plus fines passent dans les effluents liquides, mais la plus grande partie des microplastiques est piégée dans les boues utilisées ensuite comme fertilisants. C'est pourquoi les composts agricoles et les eaux d'irrigation sont une source de contamination des sols par les microplastiques. Leur dégradation produit des nanoplastiques et de nombreuses molécules dont les compositions, variées, modifient la géochimie des sols (Fuller and Gautam, 2016). Enfouis dans les sols, ils perturbent l'activité microbienne et, en milieu poreux, migrent en profondeur jusqu'à la nappe phréatique (O'Connor *et al.*, 2019). Les molécules sont absorbées par les organismes présents dans les sols, invertébrés (vers de terre), champignons, insectes pollinisateurs. L'impact de cette pollution est encore très mal connu (de Souza Machado *et al.*, 2017). Entraînés par les eaux de ruissellement, micro- et nanoplastiques passent dans les rivières avant d'atteindre le milieu marin. Les données sur leur comportement géochimique,

sur les flux de particules transportés, sur les modes de transport et sur le piégeage/relargage par les sédiments sont insuffisantes pour permettre d'établir des modèles empiriques décrivant cette pollution (Windsor *et al.*, 2019).

Plusieurs approches ont été tentées pour réduire l'impact des plastiques sur l'environnement. Des bioplastiques sont produits à partir de polymères naturels ou par polymérisation de monomères par fermentation. Toutefois les polymères ainsi obtenus, parfois au détriment de cultures alimentaires, présentent les mêmes problèmes de dégradation que ceux produits à partir de l'industrie pétrolière (Adhikari *et al.*, 2016). L'industrie chimique a développé des composés à base de polyéthylène dans lesquels des additifs spéciaux favorisent la dégradation des plastiques sous l'action de l'oxygène et de la lumière solaire. Cependant, ces plastiques, dits « oxodégradables », sont seulement susceptibles de se désintégrer en petits fragments, eux-mêmes incapables de se dégrader en espèces chimiques biocompatibles rentrant dans les cycles naturels (Prasun *et al.*, 2011). C'est pourquoi ils sont interdits en Europe. Des films totalement biodégradables ou compostables ont été élaborés pour les besoins de l'agriculture. Ils sont chers mais peuvent être enfouis par labourage et ils se dégradent dans le sol sous l'action de l'humidité et des micro-organismes. Il faut toutefois souligner que beaucoup de produits vendus comme biodégradables ne le sont que dans des conditions particulières qui doivent être précisées et qui souvent ne se rencontrent pas dans les milieux naturels. Elles nécessitent des installations industrielles, par exemple pour maintenir les températures élevées (>50°C) indispensables aux réactions chimiques et biochimiques conduisant à l'obtention d'un compost (Albertsson and Hakkarainen, 2017).

L'observation montre que les plastiques et leurs produits de dégradation ne restent pas sur les continents où ils ont été produits. Chaque année, environ une dizaine de millions de tonnes de débris plastiques sont rejetés dans l'océan (Jambeck *et al.*, 2015) et 80% d'entre eux résultent de la mauvaise gestion des déchets ménagers dans les villes. Le reste provient de déchets mal gérés au cœur des continents ou de rejets directs dans l'océan par les navires commerciaux (10 000 conteneurs sont perdus annuellement) ou les bateaux de pêche lorsqu'ils ne peuvent remonter leurs filets. Le taille de tous ces déchets est très variable, depuis les macroplastiques peu détériorés jusqu'aux micro- et nanoplastiques d'origines très diverses. Certains ont été directement libérés dans l'environnement sous forme de petites particules utilisées par exemple comme additifs dans les produits cosmétiques, d'autres résultent de l'abrasion de grands objets en cours de fabrication ou d'utilisation (pneus, textiles synthétiques), d'autres enfin proviennent de la dégradation mécanique et physicochimique des macroplastiques. Ces petites particules sont très facilement transportées par les vents, les rivières et les rejets d'eaux usées. Elles sont responsables d'une contamination qui affecte les milieux les plus reculés et la faune sauvage qui les ingère (Ulrich, 1984 ; Martin *et al.*, 2019).

Devenir des plastiques dans l'océan et conséquences sur le milieu océanique

Tous les rejets plastiques déversés à la surface de l'océan ou des mers flottent et sont entraînés sur de grandes distances par les courants marins. Ils constituent un vecteur pour des espèces envahissantes (Gregory, 2009 ; Carlton *et al.*, 2017). Dans les différents bassins océaniques, les tourbillons de grande échelle concentrent ces débris dans les zones où les vents provoquent la convergence des flux de surface (Van Sebille *et al.*, 2014 ; Van Sebille *et al.*, 2020 ; Maes *et al.*, 2018), d'où l'image d'un septième continent de plastique popularisée par les médias. Les mers intérieures ne sont pas épargnées car leurs côtes sont souvent densément peuplées. En

particulier, la Méditerranée est très polluée par les plastiques du fait de son caractère de mer semi-fermée ainsi que du temps de résidence de ses eaux, voisin de 80 ans (Lebreton *et al.*, 2012).

Les déchets flottant en surface sont soumis à une dégradation mécanique sous l'effet des vagues, et physicochimique sous l'effet du rayonnement solaire. Ces mécanismes de dégradation produisent des fragments de tailles variables, de quelques centimètres à moins d'un micron (Galloway *et al.*, 2017 ; Gigault *et al.*, 2016). Ces fragments sont susceptibles d'envahir tout le milieu marin au même titre que la matière particulaire naturelle. Les courants régionaux et les marées en rejettent une partie sur les côtes et les plages, et ce quel que soit le niveau de pollution locale (Lusher *et al.*, 2015). Les microplastiques sont maintenant présents dans toute la colonne d'eau jusqu'aux plus grandes profondeurs (Reisser *et al.*, 2015) et dans tous les sédiments océaniques (Van Cauwenberghe *et al.*, 2013). Ils ont été observés jusque dans la fosse des Mariannes (Peng *et al.*, 2018). Les mollusques (moules, huitres, etc.), les poissons d'élevage et ceux pêchés dans les eaux côtières ingèrent ces particules et leurs produits de dégradation, tels qu'additifs ou phtalates, dont la toxicité est maintenant bien établie (Baechler *et al.*, 2019). Dans les sédiments de l'océan Atlantique, de la Méditerranée et de l'océan Indien, les fibres de microplastiques sont 10 000 fois plus abondantes en volume que dans les eaux de surface contaminées (Woodall *et al.*, 2014). Les microplastiques rejoignent ainsi le cycle biogéochimique des particules en suspension dans la mer, où ils peuvent être ingérés par toute la faune sauvage, zooplancton et vertébrés marins. Par ailleurs, les plastiques transportés par les courants marins constituent également un support pour une flore microbienne dont on ignore le degré de pathogénicité (Burns et Boxall, 2018). Même si les données quantitatives sur les concentrations de micro- et nanoplastiques sont très mal connues (Gigault *et al.*, 2016), les quelques mesures effectuées en océan ouvert montrent qu'aucun de ses compartiments n'est épargné.

Aspects écologiques et sanitaires

La dégradation des plastiques en macrodéchets, puis en micro- et nanoplastiques, entraîne une préoccupation croissante pour leur impact toxicologique. On en trouvera une compilation dans la revue d'Alimba et Faggio (2019). Les travaux les plus anciens se sont concentrés sur l'impact des macrodéchets sur les vertébrés marins, les oiseaux marins et les tortues marines (Van Franeker et Law, 2015). Ces animaux se blessent, se noient ou meurent d'épuisement ou d'inanition en se retrouvant prisonniers d'enchevêtrements de macrodéchets. L'ingestion des fragments provoque des blessures internes ou bloque la digestion, augmentant morbidité et mortalité. On estime que, sur l'ensemble de la planète, environ la moitié des tortues marines ont ingéré des plastiques mais la proportion varie considérablement d'une région à l'autre, atteignant même 100% des tortues le long des côtes du Brésil (Wilcox *et al.*, 2018). En revanche, il est pour l'instant impossible de chiffrer la mortalité induite. La petite taille des microplastiques facilite leur passage à travers les membranes gastro-intestinales et leur distribution dans les tissus et les organes. Il en résulte l'induction de stress oxydatif, de réponses immunes, d'instabilité du génome, de perturbation du système endocrinien, d'anomalies au cours de la reproduction, de toxicité envers l'embryon et donc de toxicité transgénérationnelle. L'ampleur du phénomène et son impact sur les populations marines sont mal connus.

Les organismes de très petite taille, comme les prédateurs du plancton, ingèrent les particules de microplastiques qui ressemblent à leurs proies mais risquent de bloquer leur système digestif

et, pour eux, n'ont aucune valeur nutritive. Ces microparticules vont s'accumuler tout au long de la chaîne trophique (macrozooplancton, poissons, hommes) et contaminer l'ensemble des compartiments écosystémiques. Ceci est d'autant plus préoccupant que certains composés entrant dans la composition des plastiques (monomère, additifs ou coformulants) peuvent exercer des effets directs sur le système hormonal des êtres vivants, par exemple en libérant des phénols qui interfèrent sur le mécanisme d'action et le métabolisme des hormones stéroïdes. À ces effets de perturbations endocriniennes peuvent s'ajouter ceux des molécules pouvant générer des radicaux libres affectant directement le développement des organismes.

L'impact des déchets plastiques sur les êtres vivants est mal connu (SAPEA, 2020). Alors que la toxicité de l'exposition aux microplastiques est documentée par des études de laboratoire dans des conditions peu représentatives du milieu naturel, la toxicité et l'impact des nanoplastiques sont moins bien connus. Malgré la très petite taille des nanoplastiques, leur ingestion se traduit par une énorme surface de matériaux permettant de lier des composés toxiques en bien plus grande quantité que les microplastiques. Ainsi, des nanoplastiques de polystyrène d'une taille de ~70 nm ont été utilisés pour étudier la distribution tissulaire, l'accumulation, les altérations neurocomportementales et l'impact sur la santé du poisson-zèbre (Sarasamma *et al.*, 2020). Il a ainsi été démontré en laboratoire, chez cet organisme modèle, que les nanoparticules s'accumulent principalement dans les gonades, l'intestin, le foie et le cerveau, selon une distribution qui dépend en grande partie de la forme et de la taille de ces nanoparticules. Leur accumulation induit une perturbation du métabolisme énergétique et lipidique ainsi qu'une augmentation du stress oxydatif. L'exposition chronique aux nanoparticules de polystyrène induit chez le poisson-zèbre de profondes altérations de la locomotion, une agressivité et un dérèglement du rythme circadien. En outre, après une semaine d'exposition aux nanoparticules, plusieurs importants bio-indicateurs d'une toxicité paraissent altérés. En conclusion, cette étude indique que l'exposition à des nanoparticules de plastique induit chez le poisson-zèbre des altérations comportementales et moléculaires susceptibles de réduire sa probabilité de survie dans l'écosystème. Il faut toutefois souligner que les concentrations en microplastiques utilisés pour les études de laboratoire sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur à celles présentes dans la nature et ne sont représentatives des produits secondaires de dégradation ingérés par la faune sauvage ni par leur concentration, ni par leur forme (Burns et Boxall, 2018). Les concentrations utilisées dans cette étude sont 0.5 et 1.5 ppm, alors que les concentrations dans l'environnement sont souvent de l'ordre du ng/l (soit 10-12). Les études de laboratoires utilisent donc des concentrations mille à un million de fois supérieures à celles du milieu naturel et ne peuvent avoir qu'une valeur relative. Il faut en outre souligner que les méthodes de mesure dans les échantillons aquatiques naturels sont peu sensibles et ne recherchent souvent que quelques types de polymères.

Reconnu comme perturbateur endocrinien, le bisphénol-A fait l'objet d'une attention particulière en raison de son utilisation en très grandes quantités dans certains plastiques polycarbonates et les résines. Il est omniprésent dans les eaux de ruissellement. Il n'y a pas de réglementation pour l'eau. Mais l'ingestion ne doit pas dépasser 4µg/kg/jour (TDI de l'EFSA) et les quantités de bisphénol-A retrouvées chez l'humain sont de l'ordre de 1.63 µg/l (Woodruff *et al.*, 2011), 1,36µg/l (Aris, 2014), 0.4µg/l (Jiménez-Díaz *et al.*, 2016).

L'exposition des organismes aquatiques à ce perturbateur endocrinien produit des effets délétères (Wu et Seebacher, 2020). En effet, elle affecte à la fois leur comportement, leur système cardiovasculaire, leur développement, leur croissance et leur survie. Les étapes les plus précoces de la vie sont les plus vulnérables, aussi bien chez les vertébrés que chez les invertébrés ; les

invertébrés, les amphibiens et les poissons étant particulièrement affectés. Toutefois, la génétique des réponses des populations au Bisphénol-A n'est pas documentée. On manque encore d'informations sur les mécanismes par lesquels le Bisphénol-A constitue un perturbateur endocrinien. Avec l'utilisation croissante d'analogues du Bisphénol-A, on commence à se préoccuper très sérieusement de l'impact écologique de chacun d'entre eux. Ainsi, celui qui semble aujourd'hui présenter le plus de risques écologiques est le Bisphénol-F (Liu *et al.*, 2020).

Pour ce qui concerne la santé humaine, les risques potentiels liés à l'utilisation du Bisphénol-A dans la fabrication des plastiques ont fait l'objet d'un grand débat depuis une vingtaine d'années. D'après la revue récente de Conesa et Iñiguez (2020) sur les quantités présentes dans les aliments, nous ingérons de 22 à 37 mg de plastiques par an. On retrouve différents microplastiques dans les déjections humaines (Schwabl *et al.*, 2019). Suite au rapport de l'Ineris (2010), au rapport du sénateur Barbier à l'OPECST (2011), aux travaux de Rochefort et Jouanet (2011), la séance de quatre académies (Académie des sciences, Académie nationale de médecine, Académie de pharmacie et Académie d'agriculture) à l'Académie des sciences en 2016 a abouti au consensus selon lequel les femmes enceintes et allaitantes, les fœtus, les nouveau-nés et jeunes enfants doivent être considérés comme des populations potentiellement sensibles vis-à-vis des propriétés perturbatrices endocriniennes du Bisphénol-A (Académie des sciences, 2017). En France, la loi concernant l'interdiction de son utilisation dans les contenants alimentaires est effective depuis le 1^{er} janvier 2013 pour les produits destinés aux enfants de moins de 3 ans et au 1^{er} janvier 2015 pour les autres produits.

Les bisphénols ne constituent qu'un exemple de produits de dégradation des plastiques susceptibles d'affecter la santé humaine. En effet, on peut citer par ailleurs l'alkylphénol nonylphénol ajouté dans la formulation des tubes Corning et qui engendra une prolifération des cellules cancéreuses en absence d'hormones (Soto *et al.*, 1991). Les études de laboratoire ont montré la toxicité de plusieurs monomères (tels les acrylates, irritants pour la peau), des catalyseurs utilisés pour les diverses synthèses nécessaires à la fabrication des diverses molécules (tels les peroxydes organiques, les amines irritantes et parfois cancérigènes), et d'adjuvants (tels les phtalates ou les sels de métaux). Toutefois, dans les conditions usuelles d'utilisation des plastiques, les concentrations en produits toxiques sont très faibles et aucun effet notable n'a été détecté. Cependant les effets endocriniens ne sont pas étudiés et il n'y a aucun test requis. Un problème se pose lorsque des plastiques utilisés comme contenants alimentaires sont chauffés pour cuire les aliments qu'ils contiennent : les poches plastiques fondent en partie pendant la cuisson et se retrouvent ainsi dans la nourriture. La réglementation à ce sujet est encore lacunaire. Les normes actuelles basées sur des tests de toxicité classique ne prennent pas en compte les adjuvants et n'obligent pas à tester les effets des perturbateurs endocriniens. Des phtalates interdits dans les jouets et les cosmétiques sont encore autorisés dans les poches à contenu alimentaire (Annexe IV du Service national d'assistance réglementaire REACH).

En conclusion, les connaissances actuelles sur l'impact de l'exposition aux plastiques et leur ingestion sur l'accumulation tissulaire par les organismes aquatiques, ainsi que leur impact sur la santé humaine sont encore très limitées (Wright and Kelly, 2017 ; Barboza *et al.*, 2018). Ceci est vrai aussi bien pour l'impact d'une exposition aiguë que pour une exposition à très long terme. Quoi qu'il en soit, les résultats les plus récents, obtenus sur l'impact des nanoparticules de plastique sur des organismes modèles comme le poisson-zèbre, démontrent la nécessité d'un renforcement de l'effort de recherche sur l'impact de ces nanoparticules et des produits de dégradation des plastiques.

Recommandations

L'utilisation des plastiques affecte dangereusement la planète car ils donnent naissance à des déchets variés potentiellement toxiques qui ont maintenant envahi la totalité de ses enveloppes superficielles, les surface continentales, les eaux douces, l'atmosphère et les océans. Les plastiques sont utiles et il serait vain de prétendre les supprimer. Pour limiter la pollution dont ils sont responsables, il est nécessaire d'entreprendre simultanément des actions citoyennes à tous les niveaux de responsabilité de la chaîne production-utilisation pour aller vers une économie circulaire et de lancer un grand plan de recherches pluridisciplinaires pour comprendre tous les aspects de cette pollution, afin de la maîtriser.

1 – Favoriser la transition vers une économie circulaire des plastiques

1-1 Des efforts ont déjà été consentis

Même s'il est difficile de donner les chiffres exacts, on estime que la masse globale annuelle de déchets plastiques déversés dans le monde, dans les milieux aquatiques, s'élevait à environ 10 millions de tonnes en 2010. Elle a doublé en 2016 avec une pollution aquatique de 19 à 23 millions de tonnes, représentant 10% de la masse totale des déchets plastiques cette année-là (Borrelle, 2020). Selon les prévisions, elle pourrait atteindre 90 millions de tonnes par an en 2030 si la tendance actuelle se poursuit. Conscientes des enjeux, les institutions internationales (G7, Union européenne, ONU, notamment) appellent les États à mettre en place des programmes ambitieux d'utilisation raisonnée des plastiques et des systèmes de collecte et de recyclage. Dans les scénarios optimistes, cet effort pourrait réduire la pollution aquatique par les plastiques en 2030 de 20% à 50% (Borrelle, 2020). En 2040, environ 80 % des plastiques pourraient rentrer dans le cadre d'une utilisation raisonnée et d'une économie circulaire (Lau, 2020). Toutefois, en dépit de ces réductions, l'accumulation massive des déchets plastiques dans les écosystèmes et ses effets nocifs persisteront, compte tenu notamment du temps très long nécessaire à leur biodégradation.

Des études industrielles montrent que le remplacement d'emballages plastiques par des produits de substitution (verre, aluminium, cartons, tissus) a pour effet d'accroître significativement la consommation d'énergie nécessaire à leur fabrication et les rejets de CO₂ associés (Étude Denkstatt, 2011). Toutefois, ces études ne prennent pas en compte l'impact environnemental des déchets produits et restent donc peu significatives en termes de pollution globale ; elles ne permettent pas de prendre une décision.

Plusieurs actions ont été lancées pour filtrer les eaux de surface et collecter les grands morceaux de plastique flottant dans les océans. De tels efforts peuvent effectivement permettre de récupérer localement les macroplastiques dans les estuaires et les eaux côtières. C'est un premier effort mais, contrairement à la vision optimiste affichée par certains médias, il est loin de résoudre le cœur du problème. En effet, il est totalement inefficace pour éliminer les petites particules (micro- et nanoplastiques) qui représentent 99% de la pollution des océans par les plastiques.

1-2 Les efforts individuels et collectifs doivent continuer

C'est à la source qu'il faut réduire la pollution par les plastiques :

- en incitant les citoyens à pratiquer un tri efficace après usage. Il faut leur donner une information complète et simplifier les pictogrammes. Cet effort individuel des citoyens n'a de valeur que s'il est accompagné d'actions d'envergure des communautés territoriales et des industriels pour collecter tous les déchets plastiques, puis les trier et les réutiliser (EASAC, 2020). Il faut notamment uniformiser les règles de tri sur le territoire national. Enfin, des usines de taille importante seront indispensables pour prendre en charge les flux de matières à recycler ;
- en encourageant les industriels à conduire une recherche de rupture pour remplacer les plastiques de commodité par des polymères facilement dépolymérisables par des voies chimiques et/ou biodégradables. Le défi est d'autant plus grand que les plastiques de commodité les plus utilisés sont non seulement chimiquement les plus stables mais également les moins chers à fabriquer. Relever ce défi passe par une action commune impliquant les politiques, les industriels et les économistes ;
- en encourageant les industriels à prendre soin de leurs déchets de fabrication.

Le recyclage des plastiques doit être prévu dès leur conception, ce qui implique, outre d'accroître la responsabilité des industriels producteurs et celle des utilisateurs, de conduire les études pour :

- fabriquer des objets solides, de bonne qualité, destinés à servir longtemps par conception ;
- prévoir, dès le stade de la production, un marquage des produits pour faciliter leur tri après usage dans les centres industriels de récupération et de valorisation des déchets. Là encore, les règles devront être uniformisées ;
- favoriser les plastiques recyclables en instaurant des taxes modulables pour inciter les producteurs à prendre en compte les coûts environnementaux en application du principe pollueur-payeur ; le coût du plastique dans son entièreté doit être considéré (recyclage et retraitement compris) lorsqu'il est comparé à un substitut ;
- réduire le nombre de polymères et d'adjuvants pour une application donnée. En particulier, la fabrication de plastiques colorés devrait être proscrite lorsqu'elle n'est justifiée que par un souci d'attractivité commerciale ;
- arrêter la fabrication des petits objets en plastique lorsque des produits de substitution existent. Ils sont en effet une source de pollution majeure pour l'environnement continental et marin car ils s'échappent facilement de la chaîne collecte-tri-recyclage. L'effort qui a commencé récemment en France et en Europe doit être soutenu et amplifié. Le suremballage (ou *Single Use Plastic* (SUP)) doit également être banni.

2 - Un programme de recherche ambitieux

2.1 - Motivation

Toutes les observations montent que les plastiques sont néfastes pour l'environnement (Adhikari *et al.*, 2016 ; Galloway *et al.*, 2017 ; Gregory, 2009). Néanmoins aujourd'hui, la différence entre les concentrations des produits de dégradation des plastiques reconnus comme

toxiques par les études de laboratoire et celles présentes dans la nature est telle qu'il n'est pas possible d'estimer de manière fiable l'impact des micro- et nanoplastiques sur la santé humaine et l'environnement (Burns et Boxall, 2018). La transition vers la nécessaire économie circulaire doit s'accompagner d'une compréhension précise du devenir des déchets produits afin d'évaluer leur impact, de le limiter si nécessaire et ainsi de prendre les mesures politiques d'une rigoureuse sauvegarde de l'environnement et des sociétés humaines.

Alors que la production des plastiques est raisonnablement bien connue à partir des données de production des produits industriels, on ignore pratiquement tout des flux de déchets entre les différents compartiments superficiels de la planète et de leur devenir dans les réservoirs ultimes que sont les sols continentaux et, le plus important, les sédiments océaniques. Un programme de recherche fondamentale et appliquée auquel participeraient les industriels et les chercheurs universitaires-CNRS serait la clé d'une utilisation rationnelle et bénéfique des polymères par la société. Au plan international, les chercheurs universitaires-CNRS français devraient être moteurs d'un programme mondial de recherche sur l'impact des plastiques, en profitant des moyens d'action qu'offre l'International Science Council (ISC).

2.2 - Développer des polymères à faible impact environnemental

Pour améliorer le passage à l'économie circulaire, des recherches sur la chimie des polymères et des plastiques permettraient d'éviter la pollution observée actuellement. Il faudra notamment :

- mettre au point de nouveaux produits facilement recyclables ;
- développer des techniques industrielles permettant la séparation automatique des différents polymères ;
- élaborer de nouveaux plastiques susceptibles de se biodégrader dans les milieux continentaux (sols, eaux douces) et marins sans libérer de phénols qui risquent d'interférer sur le métabolisme ou l'action des hormones stéroïdes sexuelles ;
- améliorer les procédés chimiques de recyclage pour obtenir après traitement une dépolymérisation complète des déchets ;
- développer des méthodes de séparation des additifs afin d'obtenir des polymères suffisamment purs pour qu'ils puissent être recyclés ou décomposés en monomères.

2.3 - Comprendre le cycle biogéochimique global des déchets plastiques

Les déchets plastiques arrivent dans l'environnement depuis les continents où ils sont rejetés après utilisation. Ils peuvent être piégés dans les sols ou les lacs, mais la plus grande partie est transportée par les vents et les rivières jusque dans l'océan. Au cours de ce transfert, les plus gros déchets se fragmentent et se dégradent. Des débris plus petits sont aussi déversés dans les eaux usées mais ils ne sont pas retenus par les stations d'épuration et gagnent ainsi les rivières et les fleuves, puis le domaine marin. Au-delà de ces considérations qualitatives, le cycle biogéochimique des plastiques n'est pas connu avec la précision nécessaire pour évaluer les conséquences de cette pollution sur l'environnement et les êtres vivants.

Pour comprendre et modéliser le cycle des déchets plastiques sur l'ensemble de la planète, il sera donc nécessaire de :

- déterminer les cinétiques de fragmentation des macroplastiques et microplastiques ainsi que la distribution de taille des fragments relâchés dans l'environnement ;

- déterminer le devenir des composés chimiques relâchés dans l'environnement pendant leur dégradation, en raison notamment de leur charge en adjuvants potentiellement toxiques ;
- développer des méthodes fiables de mesures des nanoplastiques (taille, composition chimique) ;
- définir des protocoles d'échantillonnage des micro- et nanoplastiques dans les différents milieux ;
- déterminer les flux et les tailles des particules de plastiques transportées dans l'air, dans les eaux douces et dans les eaux marines ;
- déterminer la distribution, le transport et la concentration de ces particules dans l'océan, avec une attention particulière sur la colonne d'eau et l'interface eau-sédiments dans les mers côtières et en océan ouvert.

2.4 - Évaluer et réduire l'impact des déchets plastiques

Les études d'impact sur la faune et sur la santé des êtres humains sont encore très qualitatives et méritent d'être approfondies. Il faut notamment :

- étudier l'impact de ces débris sur la faune aquatique, marine et d'eau douce. L'attention a été attirée depuis longtemps sur les effets des gros déchets sur la macrofaune (oiseaux, mammifères, ...) mais la perturbation sur le zooplancton qui constitue la base de la chaîne alimentaire marine ne fait l'objet que d'études sommaires ;
- étudier l'impact des micro- et nanoplastiques sur tous les êtres vivants et en particulier les organismes marins et la santé humaine, en travaillant aux concentrations existant effectivement dans le milieu naturel, tel qu'il est actuellement pollué, et en prenant en compte les produits secondaires de dégradation des plastiques ;
- compléter ces travaux par des recherches épidémiologiques, tout en étant conscient de leur difficulté ;
- renforcer considérablement l'effort de la recherche sur les micro-organismes susceptibles de dégrader les plastiques, en veillant à ne pas introduire des souches invasives polluant le milieu naturel.

Il demeure essentiel de mieux maîtriser l'économie des plastiques en évitant qu'en fin de vie, ils soient dispersés dans l'environnement ou brûlés. Le recyclage est de loin la meilleure utilisation. Dans ce cadre, l'insertion des plastiques dans les matériaux de construction devrait être étudiée avec attention : en effet, ces matériaux sont, en quantité, les plus utilisés sur notre planète. Déjà, certains matériaux de haute performance dans le monde de la construction comprennent comme additif des matières organiques ; par exemple le Ductal (un béton de très haute performance) comprend 5% environ de polymères sous forme de fibres. Des recherches devront être lancées sur l'incorporation des déchets polymères à des matériaux minéraux de très fort tonnage. Ce serait une façon d'éviter aux déchets plastiques d'être soit brûlés soit dispersés dans l'environnement. C'est aussi une façon de stocker du CO₂ en faisant en sorte que les plastiques (issus en grande partie de dérivés du pétrole), en étant stockés pendant des temps très longs dans des matériaux de construction, ne contribuent plus aux émissions de CO₂.

Références bibliographiques

Académie des sciences (2017). Endocrine disruptors / Les perturbateurs endocriniens. *C.R. Biologies* 340, Issue 9-10, pp 401-452 (Philippe Bouchard, éd.). Séance du 29 novembre 2016 à l'Académie des sciences (Académie des sciences, Académie nationale de médecine, Académie de pharmacie, Académie d'agriculture).

Adhikari D *et al.* (2016). Degradation of bioplastics in soil and their degradation effects on environmental microorganisms. *Journal of agricultural chemistry and Environment*, 5, pp. 23-34.

Albertsson AC and Hakkarainen M (2017). Designed to degrade. *Science*, 358, pp. 872-873.

Alimba CG and Faggio C (2019). Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 68, pp 1-164.

Baechler BR *et al.* (2019). Microplastic occurrence and effects in commercially harvested North American finfish and shellfish: Current knowledge and future directions. *Limnology and Oceanography Letters*, 5(1), 113–136. <http://doi.org/10.1002/lol2.10122>

Barbier G (2011). *Perturbateurs endocriniens : Le temps de la précaution*. Rapport de l'OPECST.

Barboza LGA *et al.* (2018). Marine microplastic debris : An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336-348.

BDSV (2018). World Steel Recycling in Figures 2013 – 2017 https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/180222-Ferrous-report-2017-V07.pdf

Belaya ZA *et al.* (2016). Modelling approaches for designing and evaluating the performance of modified atmosphere packaging (MAP) systems for fresh produce: A review. (2016). *Food Packaging and Shelf Life*, 10, pp. 1-15.

Borrelle SB *et al.* (2020). Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*, 369, pp. 1515-1518.

Brooks AL *et al.* (2018). The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. *Science Advances* 4 (6): eaat01131.

Burns EE and Boxall ABA (2018). Microplastics in the aquatic environment: Evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(11), 2776–2796. <http://doi.org/10.1002/etc.4268>

Carlton *et al.* (2017). Tsunami-driven rafting: Transoceanic species dispersal and implications for marine biogeography. *Science*, 357, pp. 1402-1406.

- Committee.iso.org (2016). World Plastics Production 1950 – 2015
<https://committee.iso.org/files/live/sites/tc61/files/The%20Plastic%20Industry%20Berlin%20Aug%202016%20-%20Copy.pdf>.
- Conesa JA and Iñiguez ME (2020). Analysis of Microplastics in Food Samples. In: Rocha-Santos T., Costa M., Mouneyrac C. (eds) *Handbook of Microplastics in the Environment*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10618-8_5-1
- de Souza Machado AA *et al.* (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24(4), 1405–1416. <http://doi.org/10.1111/gcb.14020>
- Delfosse V *et al.* (2012). Structural and mechanistic insights into bisphenols action provide guidelines for risk assessment and discovery of substitutes. *Proc Natl Acad Sci USA* 109: 14930-5.
- Delva L *et al.* (2020). An introductory review : Mechanical recycling of polymers for dummies preprint available at <https://www.researchgate.net/publication/333390524>.
- Denkstatt (2011). *L'impact du cycle de vie des emballages plastiques sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre en Europe*. B. Brandt. H. Pilz denkstatt GmbH Hietzinger Hauptstraße 28. 1130 Vienna, Austria.
- Dris R *et al.* (2017). Sources and Fate of Microplastics in Urban Areas: A Focus on Paris Megacity <https://www.researchgate.net/publication/322177024>
- EASAC (2020). *Packaging plastics in the circular economy*. EASAC Policy report 39.
- Epa.gov (2019). Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>
- <https://resource-recycling.com/plastics/2019/11/21/epa-us-recycled-less-plastic-in-2017/>
- Fuller S and Gautam A (2016). A Procedure for Measuring Microplastics using Pressurized Fluid Extraction. *Environ. Sci. Technol.*, 50, 5774–5780.
- Galloway TS *et al.* (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology and Environment*, 1 (5), pp. 1-8.
- Geyer R *et al.* (2017). Production, use and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3 (7): e1700782.
- Gigault J *et al.* (2016). Marine plastic litter: the unanalyzed nano-fraction. *Environmental Science Nano*, DOI: 10.1039/c6en00008h.
- Gregory MR (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364 pp. 2013-2025.
- IEA (2015). Per capita demand for major plastics in selected countries in 2015, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/per-capita-demand-for-major-plastics-in-selected-countries-in-2015>

- Ineris (2014). <http://www.ineris.fr/substitution-bpa/fr>
- Jambeck JR *et al.* (2015). Plastic waste input from land into the ocean. *Science*, 347, pp. 768-771.
- Kim D and Seo J (2018). A review: Breathable films for packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, 76, pp. 15-27.
- Lambert S and Wagner M (2016). Formation of microscopic particles during the degradation of different polymers . *Chemosphere*, 161, pp 510-517.
- Lau *et al.* (2020). Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 369, pp. 1455-1461.
- Lebreton LCM *et al.* (2012). Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Marine Pollution Bulletin*, 64 (3) pp. 653–661.
- Liu J *et al.* (2020). Occurrence, toxicity and ecological risk of Bisphenol A analogues in aquatic environment – A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111481>
- Lusher AL *et al.* (2015). Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports* 5, <https://doi.org/10.1038/srep14947>.
- Maes C *et al.* (2018). A Surface “Superconvergence” Pathway Connecting the South Indian Ocean to the Subtropical South Pacific Gyre. *Geophysical Research Letters*, 45 (4), pp. 1701-2124.
- Martin C *et al.* (2019). Mangrove forests as traps for marine litter. *Environmental Pollution*, 247, pp. 499-508.
- O'Connor D *et al.* (2019). Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environmental pollution*, 249 pp. 527-534.
- OPECST (2020). http://www2.assemblee-nationale.fr/content/download/320212/3117606/version/2/file/OPECST_2020_0063_rapport_pollution_plastique-compress%C3%A9.pdf
- Panda AK *et al.* (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 233–248.
- Pathan SI *et al.* (2020). Soil Pollution from Micro- and Nanoplastic Debris: A Hidden and Unknown Biohazard. *Sustainability*, 12(18), 7255–31. <http://doi.org/10.3390/su12187255>
- Peng X *et al.* (2018). Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem Persp. Let.* 9 pp. 1-5.
- PlasticsEurope (2019). *Plastics—the Facts 2019: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data* (PlasticsEurope, Brussels). Europe https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf

- Prasun KR *et al.* (2011). Degradable polythene – fantasy or reality ? *Environmental Science and Technology* 45, pp. 4217-4227.
- Reisser *et al.* (2015). The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic gyre. *Biogeosciences*, 12, (4), pp. 1249-1256.
- Revue de l'Institut Veolia*, Facts reports (2019).
- Rochefort H and Jouannet P (2011). Endocrine disruptors and hormone dependant cancers. Mechanisms and proposal to reduce the risks. *Bull Acad Natl Med* ; 195, (8), 1965-79. 3.
- SAPEA Biodegradability of Plastics in the Open Environment (2020). Group of Chief Scientific Advisors. *Scientific Opinion* No10, December 2020.
- Sarasamma S *et al.* (2020). *Int. J. Mol. Sci.* 2020, 21(4), 1410 ; <https://doi.org/10.3390/ijms21041410>
- Schwabl P (2019). Detection of Various Microplastics in Human Stool. A Prospective Case Series. *Ann Intern Med.*, 2019;171:453-457. <https://doi:10.7326/M19-0618>
- Smith P and Lemstra PJ (1980). Ultra-high-strength polyethylene filaments by solution spinning/drawing. *J. Mater. Sci.*, 15, pp. 505-514.
- Soto AM *et al.* (1991). p-Nonyl-phenol: an oestrogenic an oestrogenic Xenobiotic released from 'modified' polystyrene. *Environ Health Perspect*, 1991; 92:167-73.
- Tournier V *et al.* (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580, pp. 216–219.
- Ulrich B (1984). Effects of air pollution on forest ecosystems and waters—the principles demonstrated at a case study in Central Europe. *Atmospheric Environment (1967)* 18 (3), pp. 621-628.
- Van Cauwenberghe L *et al.* (2013). Microplastic pollution in deep-sea sediments. *Environmental Pollution* 182 pp. 495-499.
- Van Franeker JA and Law KL (2015). Seabirds, gyres and global trends in plastic pollution. *Environmental Pollution* 203, 89-96. doi: 10.1016/j.envpol.2015.02.034.
- Van Sebille E *et al.* (2014). Adrift.org.au - A free, quick and easy tool to quantitatively study planktonic surface drift in the global ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 46, pp. 317-322.
- Van Sebille E. *et al.* (2020). The physical oceanography of the transport of floating marine debris. *Environmental Research Letters*, 15 02 3003.
- Wilcox C *et al.* (2018). A quantitative analysis linking sea turtle mortality and plastic debris ingestion. *Scient. Reports* 8:12536 | DOI:10.1038/s41598-018-30038.
- Windsor FM *et al.* (2019). A catchment-scale perspective of plastic pollution. *Global Change Biology*, 25(4), 1207–1221. <http://doi.org/10.1111/gcb.14572>

Woodall LC *et al.* (2014). The deep sea is a major sink for microplastic debris. *Royal Society Open Science* 1 (4): 140317.

Wright SL and Kelly FJ (2017). Plastic and Human health: A micro issue ? *Environmental Science and Technology*, DOI/10.1021/acs.est.7b00423.

Yoshida S *et al.* (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly-ethylene terephthalate. *Science* 351, pp. 1196–119.

Wu NC and Seebacher F (2020). Effect of the plastic pollutant bisphenol A on the biology of aquatic organisms: A meta-analysis. *Global Change Biol.* 21 May 2020 <https://doi.org/10.1111/gcb.15127>

Annexe : Les plastiques dans le monde

Source Plastic Europe

Évolution de la production mondiale (en millions de tonnes, MT)

1950	1
1980	60
2000	187
2013	299
2016	335

Total des plastiques produits jusqu'en 2016 : 8300 MT

Devenir des plastiques produits jusqu'en 2016

30%	en cours d'utilisation
49%	en décharge ou perdus dans l'environnement
12%	incinérés
9%	recyclés

Cas particulier des emballages (source Fondation Ellen MacArthur, chiffres de 2013)

Sur les 299 MT de plastiques produits, 78 MT ont servi d'emballages

Devenir

40%	mis en décharge ou dans les sols	
32%	ont disparu et seront transportés dans l'océan	
14%	incinérés	
14%	envoyés en recyclage avec un rendement modeste :	
	4%	perdus
	8%	utilisés dans des produits à bas coûts
	2%	effectivement recyclés

Personnalités auditionnées

Personnalités auditionnées par le comité des Sciences de l'environnement de l'Académie des sciences dans le cadre de la réalisation de ce rapport

21 novembre 2017

Christophe MAES (IRD/OCEANS/LOPS), UEM de Plouzané
La dérive des plastiques dans l'océan.

6 février 2018

Alexandra TER HALLE et Émile PEREZ (université Paul-Sabatier, Toulouse)
La dégradation et la fragmentation des plastiques dans les océans.

6 mars 2018

Woldemar d'AMBRIÈRES (Véolia)
La gestion des plastiques par le groupe Véolia.

16 octobre 2018

Michel VERT (CNRS, université de Montpellier)
Les matériaux dits plastiques et leur élimination face à la polymérogie et à l'environnement.

20 novembre 2018

Jean-François GHIGLIONE (Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer)
Pollution des océans par les plastiques : à quel point les « sciences de l'environnement » peuvent-elles contribuer à inverser la donne ?

5 février 2019

Pascal WONG-WAH-CHUNG (université Aix-Marseille, laboratoire Chimie Environnement, UMR 7376 CNRS)
Les déchets plastiques : de leur transformation photochimique à leurs interactions avec les polluants organiques.

9 avril 2019

Jacques LACOSTE (SGMA Clermont)
La dégradation de matières plastiques dans l'environnement.

15 octobre 2019

Isabelle LAMY (Inrae Versailles) et Johnny GASPERI (LEESU et Université Gustave Eiffel)
Impacts écotoxicologique des microplastiques sur les écosystèmes terrestres : état de l'art et besoins de recherche.

26 novembre 2019

Jean-Baptiste FINI (Museum national d'Histoire naturelle, Équipe réponses aux défis environnementaux)

Impact des composés plastiques sur la fonction hormonale.

21 janvier 2020

Pascale FABRE, Matthieu GEORGES, Emmanuelle GASTALDI et Fabienne LAGARDE (CNRS - GDR 2050, Polymères et océans)

Ce que l'on sait et ce que l'on ne sait pas sur la pollution plastique.

25 février 2020

Ika PAUL-PONT (Laboratoire des sciences de l'environnement marin, CNRS)

Impact des micro et nanoplastiques sur les organismes marins.

Composition du comité

Composition du comité des Sciences de l'environnement de l'Académie des sciences

Président

Jean-Claude DUPLESSY Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Gif-sur-Yvette

Membres

Jean-Claude ANDRÉ Membre correspondant de l'Académie des sciences, ancien directeur du CERFACS

Sébastien BALIBAR Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherches émérite au CNRS, département de Physique, École normale supérieure

Édouard BARD Membre de l'Académie des sciences, professeur au Collège de France, chaire de l'Évolution du climat et de l'océan, directeur-adjoint du CEREGE, Aix-en-Provence

Anny CAZENAVE Membre de l'Académie des sciences, chercheur émérite au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale (LEGOS-CNES), Toulouse

Marie-Lise CHANIN Membre correspondant de l'Académie des sciences, directrice de recherche émérite au CNRS

Isabelle CHUINE Membre de l'Académie des sciences, directrice de recherche CNRS au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE), université de Montpellier

Philippe CIAIS Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CEA, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Gif-sur-Yvette

Vincent COURTILLOT	Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'université Paris Diderot et à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP)
Henri DÉCAMPS	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS, Laboratoire d'Écologie fonctionnelle et environnement (EcoLab), Toulouse
Michel DELSENY	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS, Laboratoire génome et développement des plantes, université de Perpignan
Christian DUMAS	Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'École normale supérieure de Lyon
François GROS	Secrétaire perpétuel honoraire de l'Académie des sciences
Robert GUILLAUMONT	Membre de l'Académie des sciences, professeur honoraire à l'université Paris-Sud-Orsay
Philippe JANVIER	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS, Centre de recherches sur la biodiversité et les Paléo-environnements (CR2P), MNHN, Paris
Jean JOUZEL	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, CEA, Gif-sur-Yvette
Sandra LAVOREL	Membre de l'Académie des sciences, directrice de recherche au CNRS, Laboratoire d'écologie alpine, université Grenoble-Alpes, Grenoble.
Jean-Dominique LEBRETON	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS, Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE), Montpellier
Ludwik LEIBLER	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire matière molle et chimie, ESPCI, Paris
Yvon LE MAHO	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS, Institut pluridisciplinaire Hubert Curien, département Écologie, physiologie et éthologie, Strasbourg

Henri LÉRIDON	Membre correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite à l'Institut national d'études démographiques, Paris
Hervé LE TREUT	Membre de l'Académie des sciences, professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie, directeur de l'Institut Pierre-Simon-Laplace, Paris
Daniel MANSUY	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS, université Paris-Descartes, Paris
Ghislain de MARSILY	Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à Sorbonne-Université et à l'École des mines de Paris
Bernard MEUNIER	Ancien président de l'Académie des sciences
Dominique MEYER	Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à la faculté de médecine de l'université Paris-Sud-Orsay
René MOREAU	Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à Grenoble-INP
Georges PELLETIER	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite à l'Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae), Versailles
Jean-Loup PUGET	Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS, Institut d'astrophysique spatiale, l'université Paris-Sud Orsay
Henri ROCHEFORT	Membre correspondant de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'université de Montpellier
Philippe TAQUET	Ancien président de l'Académie des sciences
Alain-Jacques VALLERON	Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à Sorbonne-Université

Secrétariat éditorial

Jean-Yves CHAPRON	Directeur du service des publications de l'Académie des sciences
Florent GOZO	Adjoint du directeur du service des publications de l'Académie des sciences

